

# 岩体边坡中流体包裹体参数的逐步回归分析\*

徐金明<sup>1</sup> 刘斌<sup>2</sup> 孙昆仑<sup>1</sup>

XU JinMing<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>2</sup> and SUN KunLun

1. 上海大学土木工程系, 上海 200072

2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092

1. The Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

2. The Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2007-04-08 收稿, 2007-08-23 改回.

Xu JM, Liu B and Sun KL. 2007. Stepwise regression analysis to parameters of fluid inclusion planes in rock slopes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9):2059-2062

**Abstract** The rock slope, located near a railway tunnel in Baiheling Mountain, Zhejiang Province, China, was taken as an example to select four sections perpendicular to the slide surfaces, to collect 16 oriented samples with different deformations/failures and then to measure seven parameters of fluid inclusion planes (FIP). These FIP parameters consist of characteristic parameters of the planes and thermodynamic parameters of the inclusions in the planes. The former parameters include the lengths, configurations, connections, closings, roughness and intersection of FIP. The latter parameters include the homogenization temperatures, homogenization pressures, fluid densities, fluid compositions and fluid oxygen fugacity. The fractal dimensions of micro-crack distributions were used as a quantitative index to demonstrate the deformations/fractures of the rocks around FIP. A stepwise regression method was used to analyze the quantitative relationship between the fractal dimensions and those seven FIP parameters. It was found that two characteristic parameters (i. e., roughness coefficient and distribution density) of FIP and two thermodynamic parameters (i. e., the homogenization temperatures respectively of water solutions and CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O solutions) of the fluid inclusions were main variables to affect the rock landslide in the microscopic sense. Because the deformations or failures in rock slopes may not only lead the leakage of fluid inclusions in FIP but also change the characteristic parameters of FIP and the thermodynamic parameters of fluid inclusions, the results from the stepwise regression analysis to FIP parameters may be an important reference to further study the deformation/failure procedures and stability mechanism for rocks or for rock slopes.

**Key words** Rock slope, Fractal dimension of crack distributions, Parameters of fluid inclusion planes, Regression analysis

**摘要** 以白鹤岭铁路隧道岩体边坡为例,在垂直边坡面的4条剖面上采集了不同变形和破坏状态岩石中的16个定向样品,测定了流体包裹体迹面(Fluid Inclusion Plane 简称为FIP)特征参数(包括FIP的长度、形态、连通性、闭合性、粗糙度、交叉性质等参数)与包裹体热动力学参数(包括FIP中包裹体的均一温度、均一压力、包裹体流体密度、流体包裹体成分和氧逸度等参数)。同时,将样品中裂隙分布的分形维数作为描述岩石变形破坏状态的定量指标,采用反馈式逐步回归方法分析这些分形维数与所选7个FIP参数的定量关系。分析表明,影响岩体变形和破裂的主要微观参数包括两个FIP特征参数(即粗糙度系数和分布密度)和两个包裹体热力学参数(即水溶液包裹体均一温度和CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O包裹体均一温度)。由于岩体的变形和(或)破坏不仅可使FIP中包裹体成分泄漏,也会使FIP迹面特征参数和包裹体热动力学参数发生改变,因此,岩体边坡中流体包裹体参数的逐步回归分析结果对进一步研究岩体变形破坏过程与边坡稳定性将具有重要的参考价值。

**关键词** 岩体边坡; 裂隙分布分维数; FIP参数; 逐步回归分析

**中图法分类号** P642.2; P589.1

\* 国家自然科学基金(40572162)资助。

第一作者简介: 徐金明, 男, 1963年生, 博士, 副教授, 工程地质学和岩土工程专业, E-mail: xjming@163.com

## 1 引言

地质作用过程会产生大量的微裂隙,这些微裂隙对应的裂隙面被称为流体包裹体迹面(Fluid Inclusion Plane,简称FIP),而微裂隙在其封闭过程中捕获的周围流体介质可形成流体包裹体。长期以来,地质学家一直比较重视FIP研究,在地质应力与构造演化分析中取得了许多成果(Lespinasse and Cathelineau, 1990; 刘斌等, 1995; 倪培等, 2000; 2001, 2003; Goldstein, 2001),本文作者之一(刘斌, 1991; 刘斌等, 1995)得到了FIP迹面特征参数、包裹体热动力学参数变化与断层活动、岩体变形之间的一些关系。岩体滑坡是微裂隙产生、扩展、聚集、贯通并形成具有一定宽度断裂带的结果(Brace, 1963, 1966; Gramberg, 1989)。滑坡过程不仅产生大量的岩体变形,岩石中的FIP也会发生变形和破裂,使FIP迹面特征参数和包裹体热动力学参数发生改变。因此,FIP参数及其变化提供了岩体变形破坏的重要信息。

本文以白鹤岭铁路隧道岩体边坡为例,在测定FIP参数的基础上,以裂隙分布分形维数作为评价岩石变形和破裂的定量指标,采用逐步回归分析方法来建立FIP参数与分形维数之间的关系。

## 2 地质背景

白鹤岭岩体边坡(见图1)位于中国浙江省湖州市西北,杭州-长兴铁路以近乎南北方向穿过。岩体边坡离白鹤岭隧道北洞口约100m,铁路原以路堑形式通过(路堑长约200m、高为23.5m)。地表附近是厚度0.3~3.0m的第四系残积坡积层,出露岩层主要为二叠纪、三叠纪、侏罗纪的灰岩与白垩纪的岩浆岩。断裂构造有三组:(1)逆断层,近东西向延伸,与区域主要褶皱轴平行或微斜交;(2)正断层,走向与第一组逆断层基本一致;(3)横断层,与区域主要褶皱轴垂直或斜交。岩层中节理和FIP主要发育三组:NW320°~340°∠50°~60°、SW188°~254°∠55°~60°、NE20°~45°∠45°~70°,裂隙和FIP分布密度大,以第一组和第二组裂隙(属张性裂隙或张性FIP)最为发育,第二组裂隙和相应FIP与边坡走向夹角仅6°、基本上为顺坡向发育、对边坡稳定性起控制作用。

根据已有地面调查和钻孔资料,滑坡附近有两个大的断层通过,下伏基岩为极易风化的龙潭煤系(P<sub>1</sub>)长石砂岩,岩石中极为发育的节理把岩层切割成许多碎块。岩体滑坡发生在受强烈构造影响的长石砂岩全风化带中,滑坡长约100m、外表形态明显,多次滑动形成了多个滑坡台阶。滑坡体中及坡体附近出现了大量裂隙,这些裂隙包括滑坡陡坎、坡体后缘陡壁的擦痕及张裂隙、坡体后部与滑坡陡坎间的巨大未充填张裂隙、滑坡体上部边缘外侧多条短小张裂隙、滑坡体第二台阶右侧砂岩中的滑坡擦痕、滑坡体左侧侵入岩体

中的剪切裂隙等。滑动面为严重破碎的岩石或含水量很高的粘土。

## 3 分析方法

### 3.1 采集样品

根据地形和岩石露头的实际分布情况,使用岩石和层位尽量相同、走向基本垂直滑坡面的原则,在滑坡体北翼滑坡面下部基岩中选择四条剖面采集样品。各剖面始端为基本不变形岩石(相应样品编号为*i*=1)、末端为滑动面附近岩石(相应样品编号为*N*)、始端和末端之间距离恒定(相应样品编号为2,3,4, ..., *N*-1)。样品采集剖面 and 取样点位置见图1。

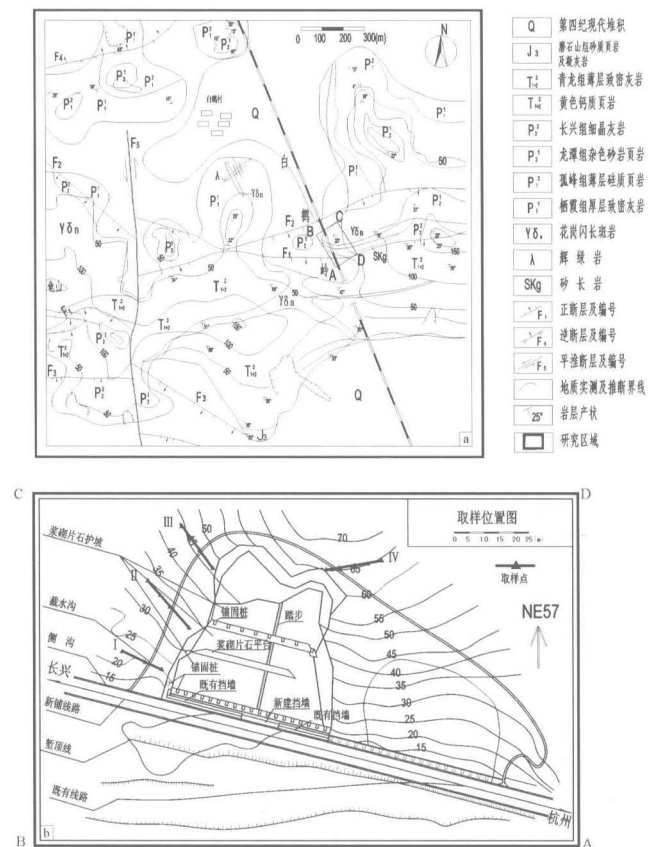


图1 白鹤岭地区地质简图(a)与取样位置图(b)

Fig. 1 The plan of geological settings (a) and sampling locations in Baiheling(b)

### 3.2 测定和计算FIP参数

FIP参数与岩体变形破裂关系不尽相同,建立模型时尽可能多地考虑相关参数*x*,开始选择的参数尽量互相独立并能定量表述。通过筛选,选择七个参数进行分析,这七个参数是:

表1 白鹤岭边坡包裹体的FIP特征参数和热力学参数

剖面	样品编号	裂隙分布的分维值 $D$	岩石类型	FIP特征参数			包裹体的热力学参数			
				张开度 ( $\mu\text{m}$ )	粗糙度系数 JRC	分布密度 /No. (mm) $^{-2}$	水溶液包裹体均一温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 溶液包裹体均一温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	水溶液包裹体流体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 溶液包裹体流体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
I	I-1	1.18	岩和砂岩	0.2 ~ 1.2	2 ~ 6	45 ~ 75	135 ~ 165	180 ~ 210	0.94 ~ 0.97	0.90 ~ 0.92
	I-3	1.36		0.4 ~ 1.8	3 ~ 7	50 ~ 78	125 ~ 180	175 ~ 260	0.93 ~ 0.97	0.83 ~ 0.93
	I-5	1.58	0.3 ~ 2.1	3 ~ 8	70 ~ 115	155 ~ 220	215 ~ 270	0.88 ~ 0.95	0.82 ~ 0.89	
II	II-1	1.20	灰岩	0.2 ~ 1.5	2 ~ 7	45 ~ 70	105 ~ 155	160 ~ 195	0.95 ~ 0.99	0.91 ~ 0.94
	II-3	1.37		0.4 ~ 1.6	3 ~ 7	50 ~ 75	125 ~ 175	175 ~ 260	0.93 ~ 0.97	0.83 ~ 0.93
	II-4	1.58		0.3 ~ 2.0	2 ~ 8	70 ~ 115	130 ~ 190	215 ~ 270	0.92 ~ 0.97	0.82 ~ 0.89
III	III-5	1.62	灰岩	0.3 ~ 2.2	3 ~ 8	70 ~ 125	165 ~ 185	200 ~ 300	0.92 ~ 0.94	0.77 ~ 0.90
	III-1	1.08		0.2 ~ 1.0	2 ~ 5	45 ~ 65	115 ~ 175	160 ~ 195	0.93 ~ 0.98	0.91 ~ 0.94
	III-2	1.22		0.3 ~ 1.5	3 ~ 7	50 ~ 80	125 ~ 180	175 ~ 260	0.92 ~ 0.97	0.83 ~ 0.93
IV	IV-4	1.60	灰岩和岩脉	0.3 ~ 2.1	2 ~ 8	60 ~ 95	130 ~ 190	215 ~ 270	0.91 ~ 0.97	0.82 ~ 0.89
	IV-1	1.65		0.3 ~ 2.3	3 ~ 8	80 ~ 110	165 ~ 185	210 ~ 290	0.92 ~ 0.94	0.78 ~ 0.89
	IV-2	1.10		0.2 ~ 1.1	2 ~ 5	45 ~ 95	105 ~ 155	160 ~ 205	0.95 ~ 0.99	0.90 ~ 0.94
IV-3	1.18		0.4 ~ 1.8	3 ~ 6	50 ~ 98	125 ~ 175	155 ~ 280	0.93 ~ 0.97	0.80 ~ 0.95	
IV-4	1.32		0.3 ~ 2.0	3 ~ 8	60 ~ 95	130 ~ 190	215 ~ 295	0.92 ~ 0.97	0.78 ~ 0.89	
IV-5	1.56		0.3 ~ 2.2	3 ~ 8	80 ~ 105	145 ~ 185	210 ~ 305	0.92 ~ 0.96	0.76 ~ 0.89	
		1.54		0.3 ~ 2.3	3 ~ 7	90 ~ 120	155 ~ 205	210 ~ 315	0.90 ~ 0.95	0.74 ~ 0.89

(1) FIP 迹面特征参数: 包括 FIP 张开度  $\mu$  ( $\mu\text{m}$ )、粗糙度系数 JRC 和分布密度 ( $\text{条}/\text{cm}^3$ ), JRC 由式(1)求得 (Barton and Choubey, 1977), 其余两个参数在实验室直接测定求出;

$$\text{JRC} = -0.8704 + 37.7844 \times [(D-1)/0.015] - 16.9304 \times [(D-1)/0.05]^2 \quad (1)$$

(2) 包裹体热力学参数: 包括水溶液和  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  包裹体均一温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、水溶液和  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  流体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), 包裹体均一温度在冷热台上直接测定求出, 包裹体密度利用相关计算公式求出。

这些参数的具体数值列于表1中。

### 3.3 计算裂隙分布分形维数

本文使用反馈式逐步回归方法分析 FIP 参数与微裂隙分布密度之间的关系, 分布密度用裂隙分布的分形维数来表征。

如果不同尺度 ( $L_1, L_2, L_3, \dots, L_k$ ) 下各样品中裂隙分布数量为  $N(L_1), N(L_2), N(L_3), \dots, N(L_k)$ , 则

$$N(L) \propto L^{-D} \quad (2)$$

$N(L)\text{-}L$  双对数图上直线的斜率即为裂隙分布的分形维数  $D_1, D_2, D_3, \dots, D_i$ , 具体数值见表1。在下面的逐步回归分析方法中, 这些分形维数将作为分析中的反应值  $Y$ 。

## 4 逐步回归分析结果

采用逐步回归分析时不同步骤的统计判断情况见表2。表2中,  $R_{\text{MSE}}$  为多元回归分析均方差平方根, 其值越小, 则拟合效果越好;  $R^2$  为复相关系数的平方, 其值越大拟合效果越好。  $R_{\text{MSE}}$  和  $R^2$  分别根据公式(3)和(4)进行计算。

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2}{n - m}} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \sum_{k=1}^n \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik} \right) \left( y_k \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k \right) \right] \beta_i}{\sum_{i=1}^n \left( y_i - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k \right)^2} \quad (4)$$

式(2)和(3)中,  $m$  为各步回归分析的变量数,  $m=7$ ;  $n$  为样本数,  $n=16$ ;  $y'_i$  为第  $i$  个样本的估计值;  $y_i$  为第  $i$  个样本的实测值;  $x_{ik}$  为第  $i$  个样本第  $k$  个参数的实测值;  $\beta_i$  为待估 FIP 参数。

由表2可以看出, 第六、第七参数在第一步即可剔除; 剩余五个参数重新计算后, 第一参数在第二步可以剔除; 此后, 再不能剔除各个参数了。因此, 第二、第三、第四和第五参数被保留了下来。换句话说, FIP 的粗糙度系数和分布密度、水溶液和  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  溶液包裹体均一温度对岩体变形破坏具有主要影响, 而 FIP 的张开度、水溶液和  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  溶液流体密度影响不大。由表2可知, 裂隙分布分维值 ( $Y$ ) 与 FIP 粗糙度系数 ( $x_2$ )、FIP 分布密度 ( $x_3$ )、水溶液包裹体均一温

度( $x_4$ )和  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  溶液包裹体均一温度( $x_5$ )之间的关系为

$$Y = 0.0524 + 0.2243x_2 + 0.009303x_3 + 0.004262x_4 - 0.005152x_5 \quad (5)$$

由式(5)可以看出,FIP粗糙度系数( $x_2$ )和分布密度( $x_3$ )为主要参数,包裹体均一温度( $x_4$ )、( $x_5$ )为次要参数; $x_2$ 越大则裂隙分布分维数值  $Y$  越大、岩体变形破坏越强烈。

表2 不同步骤的判断结果

Table 2 Determinate results for different steps

步骤	回归系数		置信区间		$R_{MSE}$	$R^2$
	列	数值	下限值	上限值		
0	1	0.004979	-0.1734	0.1833	0.07561	0.9271
	2	0.2503	0.1261	0.3745		
	3	0.008135	0.001683	0.01459		
	4	0.01635	-0.004884	0.03758		
	5	-0.005943	-0.009655	-0.00223		
	6	11.79	-8.545	32.13		
	7	-0.1135	-4.16	3.933		
1	1	0.003521	-0.1629	0.17	0.07253	0.9161
	2	0.2243	0.1322	0.3164		
	3	0.009294	0.004984	0.0136		
	4	0.004253	0.00009428	0.008411		
	5	-0.005156	-0.008034	-0.002277		
2	2	0.2243	0.1373	0.3133	0.06916	0.9161
	3	0.009303	0.005252	0.01335		
	4	0.004262	0.0003588	0.008166		
	5	-0.005152	-0.007867	-0.002437		

## 5 结语

(1) 本文以白鹤岭铁路隧道岩体边坡分析为例,测定了岩体边坡中4个剖面16个样品的流体包裹体迹面参数(包括迹面特征参数和流体包裹体参数),计算了相应的裂隙分布分形维数。采用逐步回归分析方法,研究了FIP参数与裂隙分布分形维数之间的关系,获得了相应的回归方程。

(2) 逐步回归分析结果显示,对白鹤岭边坡的岩体变形和破坏来说,FIP的粗糙度系数和分布密度、水溶液和  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  溶液包裹体均一温度(尤其是前两个参数)对岩体变形破坏具有主要影响,而FIP张开度、水溶液和  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  溶液流体密度影响不大;FIP粗糙度系数越大,则裂隙分布分形维数值越大、岩体变形破坏越强烈。

(3) 目前,利用FIP参数及其变化来分析岩体变形破坏过程处于探索阶段,不少问题还需要解决,但这一方法对岩体边坡稳定性等方面的研究将具有较好的应用前景。

## References

- Arnaud F, Boullier AM and Burg JP. 2004. Shear structures and microstructures in micaschists: The Variscan Ce'vennes duplex (French Massif Central). *Journal of Structural Geology*, 26: 855-868
- Barton N and Choubey V. 1977. The shear strength of rock joint in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10: 1-54
- Brace WF *et al.* 1966. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *Journal of Geophys. Res.*, 71: 3939-3953
- Brace WF and Bombolakis EG. 1963. A note on brittle rock growth in compression. *Journal of Geophys. Res.*, 68: 3709-3713.
- Goldstein RH. 2001. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. *Lithos*, 55: 159-193
- Gramberg J. 1989. A non-conventional view on rock mechanics and fracture mechanics, A. A. Balkeman
- Lespinasse M and Cathelineau M. 1990. Fluid percolations in a fault zone: A study of fluid inclusion plans (FIP) in the St Sylvestre granite. (NwFreoch Massif Central). *Tectonophysics*, 173-187
- Liu B *et al.* 1991. Deformed rocks, minerals, fluid inclusions, related tectonic actions and seismic activities in Shanghai and its adjacent areas (in Chinese). In: *Selected papers on modern geology*. Nanjing: Nanjing University Press, 240-258
- Liu B. 1995. Application of Fluid Inclusions in Engineering Geology (in Chinese). *Journal of Tongji University*, 23: 355-359
- Ni P, Fan JG, Tian JH and Zhou J. 2000. Mesozoic tectonic-hydrothermal activity driven gold metallogenesis in Dandong area, south Liaoning, evidence from FIP. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 506-512 (in Chinese with English abstract)
- Ni P, Jieng SY, Ling HF *et al.* 2001. The background, application, and development of fluid inclusion planes research. *Geological Review*, 47(4): 398-404 (in Chinese with English abstract)
- Ni P, Fan JG, Zhou J *et al.* 2003. Preliminary Study on Fluid Inclusion Planes for Dabie Mountain Granite. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 691-700 (in Chinese with English abstract)
- O'Reilly C, Shannon PM and Feely M. 1998. A fluid inclusion study of cement and vein minerals from the Celtic Sea Basins, offshore Ireland. *Marine and Petroleum Geology*, 15: 519-533

## 附中文参考文献

- 刘斌等. 1991. 上海及其邻近地区变形岩石、矿物、流体包裹体与构造和地震活动的关系. 见: *现代地质论文集*. 南京: 南京大学出版社, 240-258
- 刘斌. 1995. 流体包裹体在工程地质学中的应用. *同济大学学报*, 23: 355-359
- 倪培, 范建国, 田京辉, 周进. 2000. 辽南丹东地区中生代金成矿的FIP证据. *岩石学报*, 16(4): 506-512
- 倪培, 蒋少涌, 凌洪飞等. 2001. 流体包裹体面的研究背景、现状及发展前景. *地质论评*, 47(4): 398-404
- 倪培, 范建国, 周进等. 2003. 大别山花岗岩流体包裹体的初步研究. *高校地质学报*, 9(4): 691-700